

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Aloys REY

2^e THÈSE. — SUR LES PROJECTEURS A DIVERGENCE VARIABLE

Soutenue le 1938, devant la Commission d'examen.

- 4 JUIL. 1938

MM. JEAN PERRIN *Président*.

CHARLES FABRY

FRANCIS PERRIN

} *Examineurs.*

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1938

N° D'ORDRE : 43

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Aloys REY

2^e THÈSE. — SUR LES PROJECTEURS A DIVERGENCE VARIABLE

Soutenue le

1938, devant la Commission d'examen.

MM. JEAN PERRIN *Président*.

CHARLES FABRY

FRANCIS PERRIN

} *Examineurs.*

Editions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1938

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe

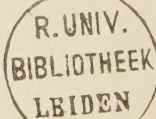
<i>Professeurs honoraires</i>	H. LEBESGUE.	BLAISE.	G. BERTRAND.
	A. FERNBACH.	DANGEARD.	ABRAHAM.
	Emile PICARD.	LESPIEAU.	Ch. FABRY.
	Léon BRILLOUIN.	MARCHIS.	Léon BERTRAND.
	GUILLET.	VESSIOT.	WINTREBERT.
	PÉCHARD.	PORTIER.	DUBOSCQ.
	FREUNDLER.	MOLLIARD	BOHN.
	AUGER.	LAPICQUE.	

PROFESSEURS

M. CAULLERY . . . T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	H. BÉGHIN . . . T	Mécanique physique et expérimentale.
G. URBAIN T	Chimie générale.	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Emile BOREL . . . T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PAUTHENIER . . .	Physique (P. C. B.).
Jean PERRIN . . . T	Chimie physique.	De BROGLIE . . . T	Théories physiques.
E. CARTAN T	Géométrie supérieure.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
A. COTTON T	Recherches Physiques.	P. JOB	Chimie générale.
J. DRACH T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	LABROUSTE	Physique du Globe.
Charles PÉREZ . . T	Zoologie.	PRENANT T	Anatomie et histologie comparées.
E. RABAUD T	Biologie expérimentale.	VILLEY	Mécanique physique et expérimentale.
M. GUICHARD . . .	Chimie minérale.	COMBES T	Physiologie végétale.
Paul MONTEL . . . T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	GARNIER T	Mathématiques générales.
L. BLARINGHEM . T	Botanique.	PÈRES	Mécanique théorique des fluides.
G. JULIA T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	HACKSPILL	Chimie (P. C. B.).
C. MAUGUIN . . . T	Minéralogie.	LAUGIER T	Physiologie générale.
A. MICHEL-LÉVY T	Pétrographie.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
H. BÉNARD T	Mécanique expérimentale des fluides.	M. CURIE	Physique (P. C. B.).
A. DENJOY T	Application de l'Analyse à la Géométrie.	G. RIBAUD T	Hautes températures.
L. LUTAUD T	Géographie physique et géologie dynamique.	CHAZY T	Mécanique rationnelle.
Eugène BLOCH . . T	Physique.	GAULT	Chimie (P. C. B.).
G. BRUHAT T	Physique.	CROZE	Recherches Physiques.
E. DARMOIS . . . T	Enseignement de Physique.	DUPONT T	Théories chimiques.
A. DEBIÈRE T	Physique Générale et Radioactivité.	LANQUINE T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
A. DUFOUR T	Physique (P. C. B.).	VALIRON	Mathématiques générales.
L. DUNOYER	Optique appliquée.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
A. GUILLIERMOND T	Botanique.	MILLOT	Biologie animale (P. C. B.).
M. JAVILLIER . . . T	Chimie biologique.	F. PERRIN	Théories physiques.
ROBERT-LÉVY . . . T	Physiologie comparée.	VAVON	Chimie organique.
F. PICARD	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	G. DARMOIS	Calcul des Probabilités et Physique mathématique.
Henri VILLAT . . . T	Mécanique des fluides et applications.	CHATTON T	Biologie maritime.
Ch. JACOB T	Géologie.	AUBEL	Chimie biologique.
P. PASCAL T	Chimie minérale.	J. BOURCART . . .	Géographie physique et Géologie dynamique.
M. FRÉCHET T	Calcul différentiel et calcul intégral.	M ^{me} JOLIOT-CURIE.	Physique générale et Radioactivité.
E. ESCLANGON . . . T	Astronomie.	PLANTFOL	Biologie végétale (P. C. B.).
M ^{me} RAMART-LUCAS. T	Chimie organique.	CABANNES	Enseignement de l'Physique.
		GRASSÉ	Biologie animale (P. C. B.).
		PRÉVOST	Chimie (P. C. B.).

Secrétaire A. PACAUD.

Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.



SUR LES PROJECTEURS A DIVERGENCE VARIABLE

Par Aloys REY

SOMMAIRE. — *Les grands projecteurs de lumière électrique sont destinés à permettre à un observateur, placé généralement dans leur voisinage, de voir un objet situé à plusieurs kilomètres. Ils sont, le plus souvent, constitués par un miroir parabolique, éclairé par le cratère d'un arc. Il résulte de la nature même de cette combinaison optique que la tache éclairée est de forme circulaire et de petites dimensions.*

La pratique a montré qu'il y a intérêt à pouvoir, dans certains cas, augmenter à volonté la divergence des projecteurs dans des limites assez étendues.

L'auteur passe en revue les procédés généralement employés jusqu'ici, puis il décrit un système de projecteur à divergence variable basé sur la segmentation du miroir en un nombre convenable d'éléments qui peuvent tourner autour d'un axe situé dans le plan focal et perpendiculaire au sens où l'on désire étaler le faisceau.

Les grands projecteurs de lumière électrique sont destinés à permettre à un observateur, placé généralement dans leur voisinage, de voir un objet situé à une distance de plusieurs kilomètres.

Ces projecteurs sont en principe des appareils produisant, à l'aide d'une source lumineuse placée à leur foyer, un faisceau de lumière aussi peu divergent que possible. A l'heure actuelle la quasi-totalité des projecteurs employés sont constitués par un miroir parabolique, métallique ou de verre mince, éclairé par le cratère d'un arc à haute intensité.

Il résulte de la nature même de cette combinaison optique que la tache éclairée par un projecteur est de forme circulaire et de petites dimensions, sa divergence maximum (1) étant au plus de l'ordre de 30 millièmes d'angle sur les modèles habituellement employés.

La pratique a montré qu'il y aurait grand intérêt dans certains cas à pouvoir à volonté augmenter cette divergence, et dans des limites assez étendues.

Le but du présent exposé est de passer en revue les procédés employés à notre

(1) Qui correspond aux rayons centraux et est égale au rapport du diamètre du cratère à la longueur de la distance frontale.

connaissance dans ce but, en décrivant particulièrement l'un d'eux, qui a donné des résultats pratiques fort intéressants.

Exfocalisation.

La façon la plus simple d'augmenter la divergence d'un projecteur semble devoir être de déplacer le cratère parallèlement à lui-même et suivant l'axe optique. En le rapprochant du miroir, on augmente évidemment le diamètre de la tache éclairée.

L'expérience montre qu'en exfocalisant ainsi la source on augmente bien le diamètre de la tache éclairée, mais que l'intensité lumineuse sur l'axe du faisceau baisse très rapidement, en sorte que la tache lumineuse circulaire arrive à présenter en son centre un *trou noir* bien connu des praticiens.

M. Blondel, dans un travail déjà ancien (2), a démontré par le calcul que dans un projecteur à miroir parabolique éclairé par une source lumineuse circulaire et de brillance uniforme, une exfocalisation de quelques pourcent réduisait dans des proportions considérables la puissance lumineuse sur l'axe.

Il ne peut donc être question d'employer l'exfocalisation pour obtenir une augmentation importante de la divergence d'un projecteur.

Remarquons d'ailleurs que ce procédé, même s'il était admissible, augmenterait également la divergence verticale et la divergence horizontale du faisceau, alors qu'en pratique il est généralement préférable de n'augmenter qu'une de ces quantités, l'autre restant fixe.

Dispenseur lenticulaire.

L'idée d'augmenter la divergence du faisceau d'un projecteur au moyen d'une série de lentilles cylindriques, produisant dans un sens la dispersion désirée et n'agissant dans le sens perpendiculaire que comme des lames à faces parallèles, est ancienne. Mais la première combinaison optique permettant de faire varier à volonté la divergence horizontale (ou verticale) en associant un jeu de lentilles cylindriques planconvexes et un jeu de lentilles cylindriques planconcaves remonte au Colonel Mangin, que l'on peut regarder comme l'auteur de la première solution pratique du problème des projecteurs à divergence variable (3).

La disposition primitive de l'inventeur fut perfectionnée par Paul Lemonnier, puis par Jean Rey.

(2) André Blondel : Détermination et étude des caractéristiques d'éclairement des projecteurs. *Annales de Physique*, mai-juin 1917.

(3) Colonel Alphonse Mangin : *Mémorial de l'Officier du génie*, N° 25 (1876), p. 219 et suiv. En réalité la combinaison décrite alors par Mangin ne comporte pas encore son Miroir aplanétique à double courbure sphérique.

Elle a donné lieu à un grand nombre d'applications, réalisées pour des projecteurs de grand diamètre.

Le plus important de ces appareils a été, à notre connaissance, réalisé en 1932 et appliqué à un projecteur de 120 cm. Il comprenait :

22 lentilles planconvexes de 182 mm de distance focale

22 lentilles planconcaves de 158 mm de distance focale

(les lentilles planconvexes sont les plus proches du miroir) et permettait de faire varier entre 46 et 312 millièmes la divergence de ce projecteur, qui sans disperser avait une divergence maximum théorique de 26 millièmes et une divergence pratique (résultant des mesures) de 38 millièmes environ.

La caractéristique des disperseurs lenticulaires est, lorsqu'ils sont écartés pour donner la plus grande divergence, une parfaite homogénéité de l'éclairement sur plus de 50 % de la largeur de la tache éclairée. Par contre, de tels appareils présentent de sérieux inconvénients.

Ils sont lourds (plus de 120 kg), très fragiles et couteux ; enfin leur rendement est faible.

Le calcul permet en effet de prévoir des pertes :

1° *Par réflexion.* — En appliquant la formule de Fresnel pour une incidence normale

$R_{\text{norm.}} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$, soit pour le crown $R = 0,042$, aux quatre réflexions successives, en désignant par 1 le flux incident et en prenant les deux premiers termes du développement en série, le flux transmis sera

$$1 - 4 R_{\text{norm.}} = 1 - 0,168 \simeq 0,83.$$

2° *Par absorption.* — Il faut compter 1,62 % par centimètre, soit, pour le disperseur considéré d'épaisseur moyenne 1,3 cm, 2,1 %.

3° *Par diffusion :*

a) par la surface imparfaitement polie ;

b) dans la masse : bulles, masses laiteuses, diffusion moléculaire ;

c) par les parois.

Ces pertes sont difficilement chiffrables, la plus importante, la perte par diffusion par la surface, varie fortement avec l'état de propreté de la surface.

4° Pertes dues aux joints des lentilles ; elles ont été évaluées à 3 %.

Soit au total $17 + 2,1 + 3 +$ diffusion,

soit au moins 22,1 %.

Il faut ajouter à ceci les pertes dues aux aberrations des lentilles qui créent des faisceaux fortement inclinés, dont l'effet est négligeable à distance.

L'expérience a montré qu'en réalité les pertes étaient supérieures aux prévisions du calcul.

Le projecteur a en effet accusé une perte :

1^o En intensité sur l'axe, de 43 % ;

2^o En flux :

a) disperseur au minimum de divergence, 36 % ;

b) disperseur au maximum de divergence, 40 %.

Les pertes dues à la diffusion et aux aberrations sont donc très importantes.

La solution du Colonel Mangin est acceptable pour les petits calibres, mais pour les grands calibres elle conduit à des poids et des encombrements tels qu'il faut la remplacer par une autre solution, basée sur des principes tout différents.

Projecteurs à miroirs segmentés.

Cette nouvelle solution a été rendue possible par les progrès de la technique de fabrication des miroirs paraboliques en verre, qui ont permis de sectionner ceux-ci en un nombre quelconque d'éléments égaux ou inégaux.

Soit donc un miroir parabolique en verre que nous supposerons divisé (pour fixer les idées) en quatre segments égaux.

Si nous plaçons au foyer d'un de ces segments le cratère plan d'un arc à brillance uniforme et rayonnant suivant la loi de Lambert, nous obtiendrons une tache lumineuse circulaire dont le diamètre correspondra à la divergence maximum (4) du projecteur

$$B = \frac{\delta}{f}$$

δ , diamètre du cratère ;

f , distance frontale du miroir.

L'éclairement de cette tache croîtra rapidement depuis le bord jusqu'à une partie centrale correspondant à la partie supérieure de la caractéristique du miroir.

Si A est le sommet du miroir, AB le demi-diamètre vertical, et AC le demi-diamètre horizontal qui limitent le quart de miroir ($AB = AC = h$), au point B le cratère sera vu suivant une ellipse

$$\text{dont le grand axe sera} = B_1 = \frac{4f\delta}{h^2 + 4f^2} ;$$

$$\text{dont le petit axe sera} = B_2 = 4f\delta \times \frac{4f^2 - h^2}{(4f^2 + h^2)^2} .$$

(4) Définie par M. Blondel dans son mémoire de 1894 : *Théorie des projecteurs électriques*.

La partie centrale de la tache dont l'éclairement sera uniforme se composera de deux quarts de cercle dont le diamètre sera proportionnel à B_2 et d'arcs d'ellipse correspondant à l'intersection de deux ellipses dont les axes B_1 et B_2 sont respectivement perpendiculaires (figure 1).

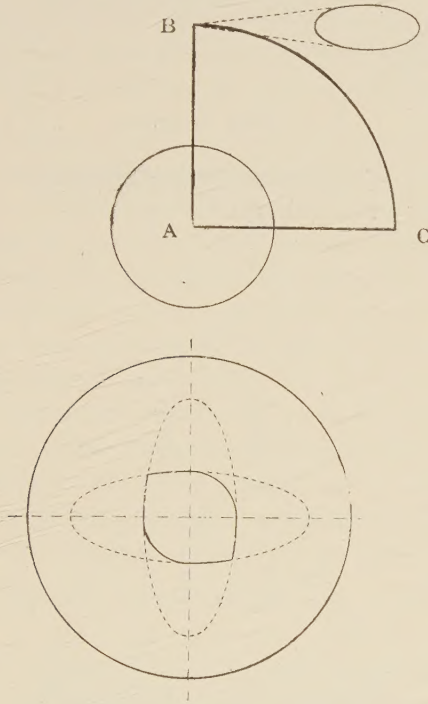


FIG. 1.

Si nous faisons tourner d'une quantité convenable les quatre quarts de miroir autour d'un axe (vertical) passant par le foyer et perpendiculaire à l'axe optique, nous pourrions juxtaposer les faisceaux émis par chacun de ces quatre segments de miroir de façon à obtenir un faisceau résultant dont la divergence verticale sera celle du miroir complet et dont la divergence horizontale sera voisine de 4 fois cette quantité (figure 2).

Calcul de la caractéristique d'un projecteur divergent à miroir segmenté.

La caractéristique d'un projecteur a été définie par M. Blondel dans sa Théorie des projecteurs électriques. C'est la courbe obtenue en portant en abscisses la divergence et en ordonnées la puissance lumineuse sur l'axe.

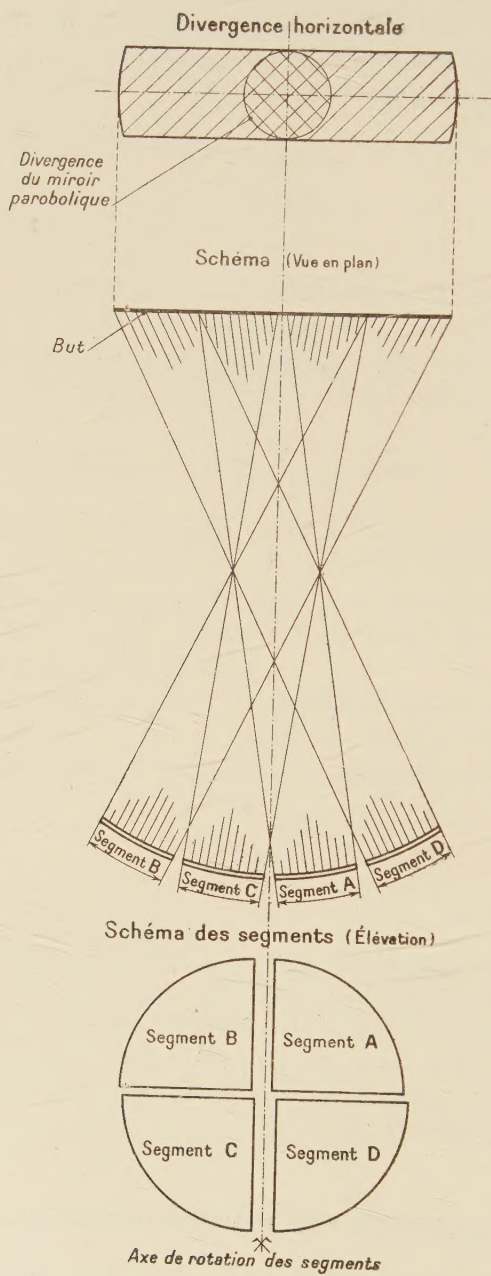


FIG. 2. — Projecteur à divergence horizontale variable.
Schéma du dispositif.

Pour tracer la caractéristique du projecteur à miroir segmenté que nous avons à étudier, nous avons supposé en première approximation :

1° que la puissance lumineuse sur l'axe était pour chaque quart de miroir $\frac{1}{4}$ de celle émise par le miroir complet et que la divergence de la partie centrale de la tache était celle du miroir complet, ce qui revient à confondre cette partie centrale avec un cercle de diamètre proportionnel à B_2 dont l'éclairement est uniforme (ce qui n'est exact que sur les deux quarts de cercle) ;

2° que le cratère de l'arc à haute intensité, qui n'est pas plan mais creux, et dont la brillance décroît depuis le centre jusqu'aux bords, pouvait être remplacé par un cratère plan de brillance uniforme déterminé comme suit. Des essais antérieurs exécutés par M. Jean Rey et M. Marsat avaient permis de voir que le flux émis par un cratère d'arc intensif à 150 ampères de 13 mm de diamètre utile correspondait à une brillance moyenne de 300 bougies par millimètre carré de la surface du cratère. A cause de la forme creusée du cratère, ce flux ne peut être utilisé aussi avantageusement par le miroir que si le cratère était plan. L'épure de Rousseau montre que le flux utilisé est de 84 % de celui qu'utiliserait le miroir s'il était éclairé par un cratère plan rayonnant suivant la loi de Lambert, la brillance de l'arc a été fixée à $0,84 \times 300$ bougies/mm². Le rendement du projecteur étant d'après le calcul de 0,65 (pertes et occultations) et le diamètre du miroir de 120 cm, la puissance lumineuse sur l'axe est donc de 185 000 000 bougies environ — soit, pour chaque quart de miroir, $\frac{185}{4} \times 10^6$ bougies.

Le miroir choisi ayant une distance frontale $f = 500$ mm, on peut facilement calculer les divergences maximum B et minimum B_2 d'après les formules données plus haut, ce qui permet de tracer le trapèze rectiligne correspondant en première approximation à la caractéristique.

Dans son mémoire de 1917, M. Blondel a donné l'équation générale de la caractéristique d'un miroir parabolique éclairé par un cratère plat de brillance uniforme. Cette expression n'étant pas intégrable en général, il a exposé une méthode graphique permettant de tracer par points les côtés non parallèles de la caractéristique et donné des tables de caractéristiques calculées pour certaines ouvertures de miroirs.

Nous avons utilisé ces tables pour tracer la caractéristique du quart de miroir.

Une fois cette caractéristique tracée, on peut fort simplement tracer la caractéristique résultante qui correspond aux quatre segments, en juxtaposant les quatre caractéristiques élémentaires.

Cette courbe, qui correspond à la juxtaposition de quatre trapèzes, montre que l'éclairement ne sera pas uniforme. On peut soit se donner une divergence maximum à atteindre et en déduire le coefficient d'uniformité d'éclairement de

la tache, soit se donner le coefficient d'uniformité et en déduire la divergence maximum atteinte.

Dans l'appareil réalisé, nous nous étions fixé une divergence maximum de 100 millièmes d'angle.

Résultats d'essai.

La figure 3 représente la caractéristique calculée, rapportée à 4 000 mètres pour trois valeurs de la transparence.

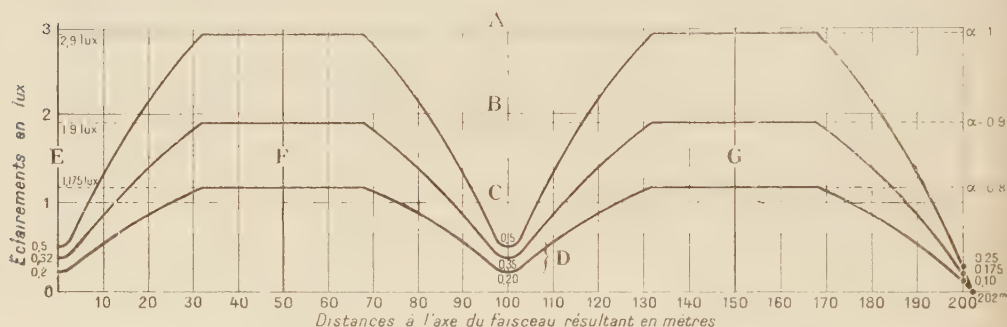


FIG. 3. — Projecteurs à divergence horizontale variable. Caractéristique à 4 000 m d'un projecteur.

Données des calculs $\left\{ \begin{array}{l} f = 500 \text{ (charbons intenses).} \\ \Delta = 1\,200 \\ \delta = 13 \end{array} \right.$

Echelles : ordonnées 12 mm pour 1 lux.
abscisses 6 mm pour 10 mètres.

- A. Eclaircissement maximum pour $a = 1$: 2,9 lux.
- B. — — — — — $a = 0,9$: 1,9 lux.
- C. — — — — — $a = 0,8$: 1,175 lux.
- D. Eclaircissements minimums.
- E. Axe vertical de symétrie du faisceau résultant.
- F. Centre du faisceau intérieur.
- G. Centre du faisceau extérieur.

1° *Divergence.* — Nous avons comparé aux prévisions du calcul les résultats obtenus avec le projecteur réalisé de 120 cm de diamètre, 500 mm de distance frontale, éclairé par un arc à haute intensité de 150 ampères.

Opérant sur une base de 80 mètres, nous avons, pour quatre écartements des segments de miroir, mesuré la largeur de la tache éclairée, en tenant bien entendu compte du diamètre apparent du projecteur, qui était à cette distance de 15 millièmes, ce qui n'est pas négligeable ; la figure 4 représente les résultats trouvés, dont l'accord est assez satisfaisant avec le calcul, en égard aux hypothèses faites.

2° *Caractéristique d'éclaircissement.* — Nous avons sur la même base procédé à des mesures d'éclaircissement. La position des maxima et minima d'éclaircissement a été

déterminée de la façon suivante : l'observateur placé contre la cible se déplaçait en observant le projecteur à travers un écran en verre noirci ; il voyait alors l'éclat de chaque quart de miroir augmenter jusqu'à un maximum, puis décroître jusqu'au moment où le quart de miroir suivant s'éclairait à son tour.

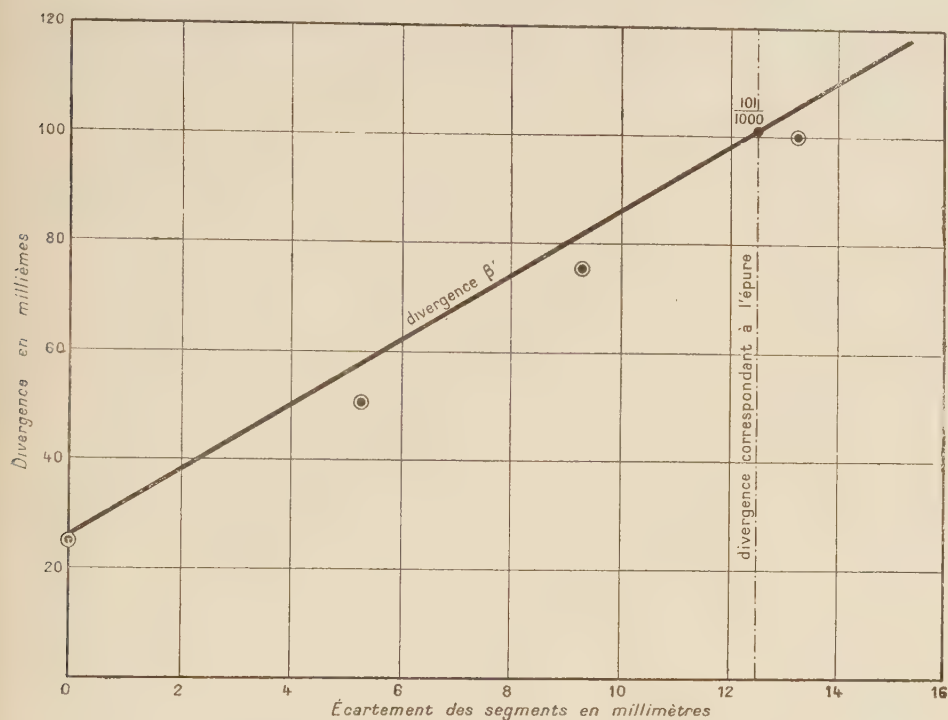


FIG. 4. — Projecteur à divergence $f : 50\%$. Mesure de la divergence en fonction de l'écartement des segments du miroir.

Ecartement nul : $\beta' = 26/1000$.

total : $\beta' = 101/1\ 000$.

Les points encadrés correspondent aux relevés des essais du 17 octobre 1930 (ce sont les repères tracés pour 50/1 000, 75/1 000, 100/1 000).

Pour chaque maximum ou minimum ainsi déterminé, l'éclairement au but a été mesuré à l'aide d'un luxmètre Blondel-Holophane.

Les mesures sont résumées au tableau suivant :

Distance au bord droit du faisceau, en mètres	Eclairement, en lux
0	83
0,90	5 400
1,90	8 800
2,90	2 900
3,85	6 750
4,90	2 500
5,90	9 650
7,20	3 900

La droite et la gauche du faisceau correspondent à la droite et à la gauche d'un observateur placé au projecteur et regardant la cible. La disposition des lieux n'a pas permis de faire de mesures du côté gauche du faisceau à plus de 7 m, 20 du bord droit.

On peut comparer ces résultats aux prévisions du calcul : Si l'on néglige en première approximation l'absorption atmosphérique sur 80 mètres, ces éclairagements multipliés par 4×10^{-4} représenteront l'éclairément à 4 kilomètres pour la transparence unité. La figure 5 donne les résultats des essais et les prévisions du calcul.

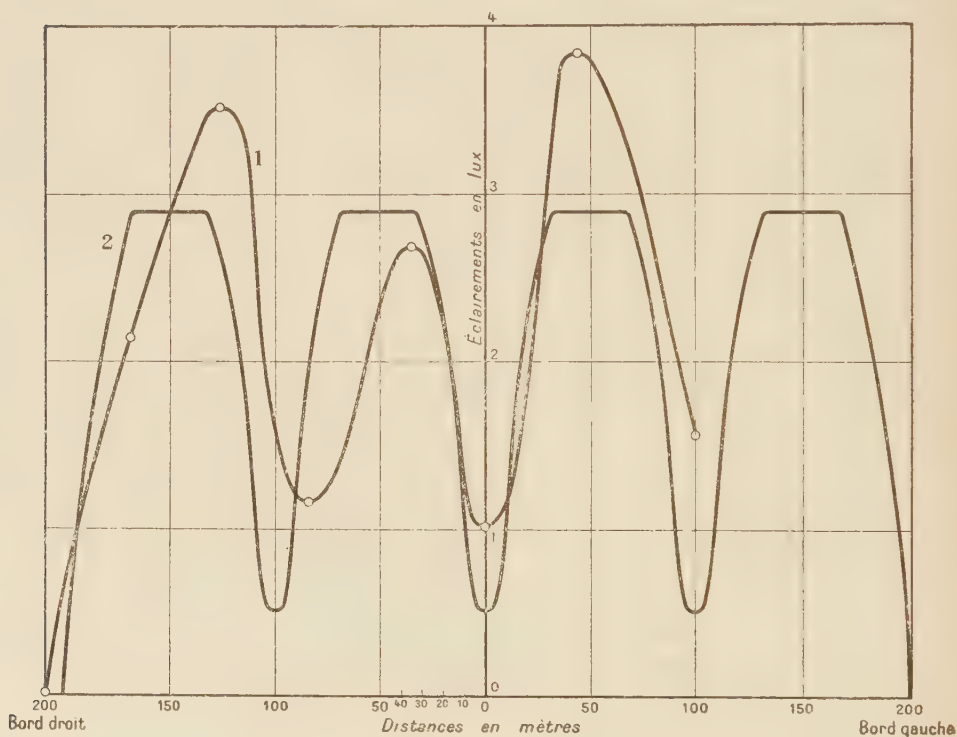


FIG. 5. — Projecteur à divergence horizontale variable $f:500$.
 Comparaison des résultats des essais ramenés à 4 000 mètres avec les caractéristiques calculées, la transparence étant l'unité.

1. Courbe mesurée.
2. Courbe calculée.

Echelles : abscisses : 0 mm, 55 pour 2 mètres.
 ordonnées : 22 mm, 4 pour 1 lux.

Ce diagramme montre un défaut de calage du deuxième segment à partir de la droite : il montre également combien la caractéristique d'un segment de miroir éclairé par un arc intensif est plus pointue que si ce segment est éclairé par un

cratère plat de brillance uniforme. Si l'on veut obtenir un meilleur accord du calcul et de l'expérience, il faut abandonner cette hypothèse par trop simpliste.

On peut alors supposer que la brillance du cratère décroît depuis le centre jusqu'au bord ; une méthode graphique qui sera développée ultérieurement donnera le calcul de la caractéristique d'un projecteur en partant de ces nouvelles hypothèses.

Vu et approuvé :
Paris, le 6 mai 1938.
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie de Paris,
G. ROUSSY.

2730. — Imprimerie Jouve et Cie, 15, rue Racine, Paris. — 5-1938
